

양극산화처리된 적층제조 Ti-6Al-4V 합금의 표면 특성

강창민^{1,††} · 이주희^{2,††} · 안경빈¹ · 문종주³ · 고영민³ · 안태정³ · 장희진^{1,†}

¹조선대학교 신소재공학과, 광주광역시 동구 조선대 5길 60

²조선대학교 첨단소재공학과, 광주광역시 동구 조선대 5길 60

³조선대학교 광기술공학과, 광주광역시 동구 조선대 1길 10

(2025년 12월 04일 접수, 2026년 2월 07일 수정, 2026년 2월 12일 채택)

Surface Characterization of Anodized Additively Manufactured Ti-6Al-4V Alloy

ChangMin Kang^{1,††}, JuHee Lee^{2,††}, KyungBin Ahn¹, Jong-Ju Moon³, Young-Min Ko³,
Tae-Jung Ahn³, and HeeJin Jang^{1,†}

¹Department of Materials Science and Engineering, Chosun University, 60, Chosundae-5gil, Dong-gu, Gwangju, 61452, Republic of Korea

²Department of Advanced Materials Engineering, Chosun University, 60, Chosundae-5gil, Dong-gu, Gwangju, 61452, Republic of Korea

³Department of Photonic Engineering, Chosun University, 10, Chosundae-1gil, Dong-gu, Gwangju, 61452, Republic of Korea

(Received December 04, 2025; Revised February 07, 2026; Accepted February 12, 2026)

The effect of anodizing voltage (9, 45, and 90 V) on the surface properties of subtractively manufactured (SM) and additively manufactured (AM) Ti-6Al-4V alloys was comparatively investigated, with a focus on barrier-type anodic oxide films. While the anodizing behavior associated with porous oxide films on Ti-6Al-4V has been widely reported, studies on barrier-type anodized surfaces of AM alloys are limited. The surface characteristics of specimens anodized at different voltages were examined using reflectance spectroscopy, X-ray diffraction (XRD), glow discharge spectroscopy (GDS), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), and potentiodynamic polarization tests. Although visual differences were subtle, reflectance spectra facilitated the comparison of voltage-dependent color changes and gloss variations. XPS confirmed the formation of TiO₂, Al₂O₃, and VOPO₄ on both SM and AM alloys at all voltages. GDS revealed a higher phosphorus content in AM alloys compared to SM alloys, which may be related to the relatively lower amount of vanadium oxides detected in AM alloys by XPS. Potentiodynamic polarization tests showed no distinct trend in corrosion potential; however, AM alloys exhibited higher corrosion rates and passive current densities than SM alloys. These findings indicate that the manufacturing route affects anodic oxide chemistry and corrosion behavior, even under identical anodizing conditions.

Keywords: Anodizing, Additively Manufactured, Surface characterization

1. 서론

Ti-6Al-4V 합금은 높은 비강도와 뛰어난 내식성을 가진 합금으로 항공우주 및 해양산업 등 다양한 산업에서 활발하게 사용되는 대표적인 $\alpha + \beta$ 타이타늄 합금이다. 그러나 Ti-6Al-4V를 포함한 타이타늄 합금은 높은 항복강도로 인해 가공이 어렵고 내마모성이 떨어지는 한계를 가진다. 이러한 부족한 내마모성을 보완하기 위해 양

극산화, 피닝 처리 등 다양한 표면처리에 대한 연구가 이전부터 활발히 진행되어 왔다 [1-3]. 다양한 표면처리 중 양극산화는 비교적 저렴한 비용으로 화학적 안정성이 뛰어난 산화 피막을 인위적으로 생성할 수 있어 다양한 산업에서 활용되고 있다. 한편, 가공성을 개선하고 형상 자유도를 확보하기 위해 최근에는 타이타늄 합금 부품 제조 분야에 적층가공(Additive Manufacturing) 기술을 접목하는 추세이다. 적층가공 기술을 적용한 Ti-6Al-4V 합금은 복잡한 형상을 요구하는 항공우주 산업 및 부품 제조 산업에서 활발하게 활용되고 있다.

Ti-6Al-4V 합금에 대한 양극산화처리 관련 연구는 많이 진행되어 왔다. Saraswati [4]에 따르면 전압을 인가

[†]Corresponding author: heejin@chosun.ac.kr

^{††}These authors contributed equally to this work.

강창민: 박사과정, 이주희: 박사과정, 안경빈: 박사과정, 문종주: 박사과정, 고영민: 박사과정, 안태정: 교수, 장희진: 교수

하여 생성해낸 산화피막은 다양한 색상을 구현해내고 소재의 내식성을 향상시킬 수 있는 방법으로 알려져 있다. 또한 Krasicka-Cydzik [5] 및 Sharma [6]에 따르면 일반적으로 양극산화공정을 통해 형성되는 산화막의 두께는 인가전압이 증가함에 따라 두꺼워진다고 보고하였다. TiO₂ 결정상 종류로는 rutile, anatase, brookite가 있는데 Ti-6Al-4V 합금을 양극산화 할 경우 형성된 TiO₂의 결정상은 주로 rutile 상으로 anatase 상에 비해 내마모성, 내식성이 더 우수하다고 알려져 있다 [7,8].

다만, 적층제조 합금의 양극산화처리에 대한 연구는 아직 많은 연구가 진행되지 않은 상황이다. 특히, 다공성 양극산화피막 [9-11]이 아닌 장벽형 양극산화피막으로 처리된 적층제조 합금에 대한 연구는 더욱 부족한 실정이다. 본 연구에서는 황산 수용액을 사용하여 다양한 전압에서 장벽형 양극산화 피막을 형성시키고 적층제조(AM; Additively Manufactured) Ti-6Al-4V 합금을 절삭가공(SM; Subtractive Manufacturing) Ti-6Al-4V 합금과 비교하였다.

2. 실험방법

2.1 시료 준비

절삭가공 Ti-6Al-4V 합금과 DED (Direct Energy Deposition) 공정으로 제조된 적층제조 Ti-6Al-4V 합금을 시료로 사용하였다. 적층제조 Ti-6Al-4V 합금은 적층 방향에 평행한 면을 대상으로 시료를 제작하였다. 절삭가공 및 적층제조 Ti-6Al-4V 합금은 각 35 × 10 × 2 mm의 크기로 절단하였다. 양극산화 처리 전 각 시료는 SiC 연마지로 2000 grit 까지 표면 연마를 진행하였다.

2.2 양극산화 처리

Anode에는 양극산화 처리를 진행할 대상인 SM Ti-6Al-4V 합금, AM Ti-6Al-4V 합금을 사용하였다. 대전극인 cathode에는 anode와 동일한 크기의 SM Ti-6Al-4V 합금을 사용하였다. 전극 간의 거리는 10 cm 내외로 하였다. 표면에 생성된 자연산화 피막 및 표면 불순물을 제거하기 위한 전처리 용액은 0.1 M HNO₃ + 0.3 M HF 혼합용액을 사용하였다. 시료 양극산화 진행을 위해 전해질로 1 M H₂SO₄ + 1 M HPO₃ (25 °C ± 5 °C) 수용액을 사용하였다. 이후 Ti-6Al-4V 합금은 전해질에 침지해둔 상태로 9 V, 45 V, 90 V의 전압을 인가하여 30 분 동안 양극산화를 진행하였다.

2.3 양극산화 피막 표면 분석

비커스 경도기를 이용하여 하중 2 kgf를 10초 동안 인가하여 5회 반복 측정 후 평균값을 구했다. 거칠기는

접촉식 거칠기 측정기를 사용하여 임의의 5곳을 0.5 cm 길이로 측정 후 평균값을 구했다.

양극산화 후 산화 피막의 색상을 육안으로 관찰하고 각 시료의 반사광 스펙트럼을 분석하였다. 반사광 스펙트럼 측정은 400 ~ 700 nm의 파장 범위인 가시광선 영역에서 360 ~ 2600 nm 파장 범위를 가진 Stabilized Fiber-Coupled Light Source와 200 ~ 1000 nm 파장 범위의 Compact Spectrometer를 사용하여 시료를 분석하였다.

시료별 인가 전압에 따른 표면 상분석을 위해 XRD (X-Ray Diffraction) 분석을 진행하였다. 깊이별 원소 함량을 측정하기 위해 GDS (Glow Discharge Spectrometry) 분석을 진행하였고 시료별 표면의 원소 조성 분석을 위해 XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) 분석을 진행하였다.

2.4 동전위 분극 시험

양극산화 피막의 내식성을 분석하기 위해 양극산화 처리 전/후 각 시료에 대해 동전위 분극 시험을 3회 반복 진행하였다. 동전위 분극 시험 시, 작업 전극(Working electrode), 상대 전극(Counter electrode), 기준 전극(Reference electrode)으로 구성되는 3전극 전기화학 셀을 이용하였다. 작업 전극으로 사용된 시료는 각 전압에서 양극산화 처리된 SM Ti-6Al-4V 합금, AM Ti-6Al-4V 합금이며 노출면적은 1 cm²이다. 상대 전극으로는 백금(Pt)을 사용, 기준 전극은 포화 칼로멜 전극(SCE electrode)을 사용하였다. 전기화학 분극 시험에 사용된 용액은 초고순도 질소가스로 탈기된 pH 6.5 ± 0.2, 상온(25 °C ± 3 °C)의 3.5 wt% NaCl 수용액이다. 개방회로전위(Open Circuit Potential, OCP) 기준 -500 mV_{SCE} 전위에서 시작하여 500 mV_{SCE}까지 전위를 1 mV/s씩 증가시키며 인가하여 진행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 경도 및 거칠기

Fig. 1는 양극산화 전 시료와 9 V, 45 V, 90 V를 인가하여 양극산화 처리를 한 시료 표면의 경도를 측정된 결과이다. SM Ti-6Al-4V 합금과 AM Ti-6Al-4V 합금은 양극산화 처리 전 경도는 약 330 Hv로 차이가 크지 않았다. 그러나 양극산화 처리를 한 후에는 SM Ti-6Al-4V 합금과 AM Ti-6Al-4V 합금의 경도 값 차이를 보였다. 특히, Fig. 1a, b를 통해 알 수 있듯이 SM Ti-6Al-4V 합금은 인가 전압에 따른 경도 값 변화가 크지 않았고 AM Ti-6Al-4V 합금은 양극산화 처리 전 경도 값이 약 330 Hv 정도에서 인가 전압이 증가함에 따라 경도 또한 증가하는 경향을 보였다. 모든 인가전압 조건

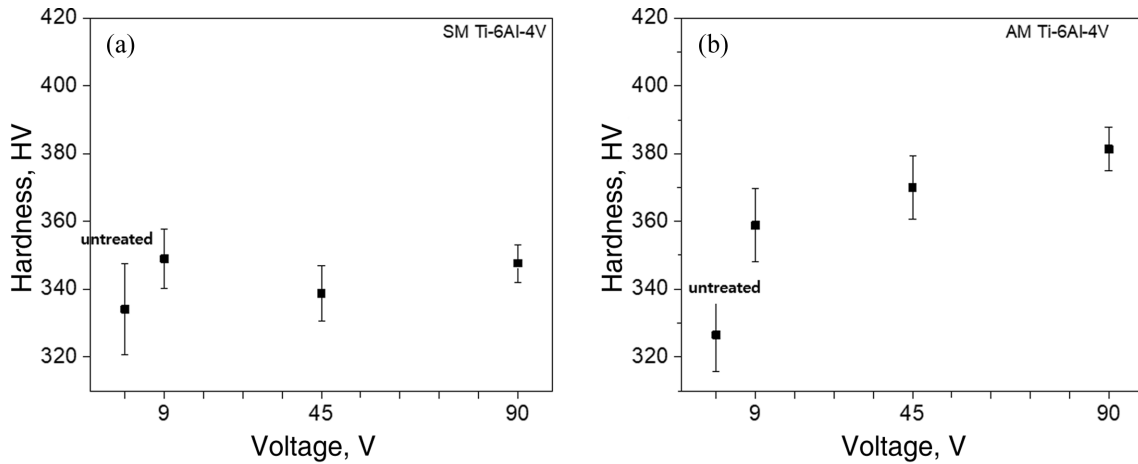


Fig. 1. Hardness of (a) SM Ti-6Al-4V and (b) AM Ti-6Al-4V

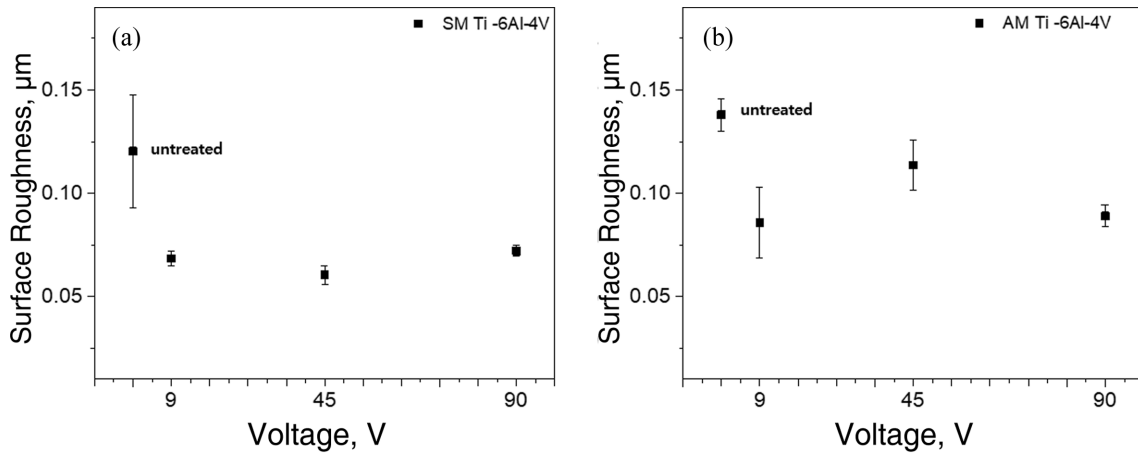


Fig. 2. Surface roughness of (a) SM Ti-6Al-4V and (b) AM Ti-6Al-4V

에서 양극산화 후 AM Ti-6Al-4V 합금의 경도 값이 SM Ti-6Al-4V 합금의 경도 값보다 높았다. 이는 높은 경도 값을 가지는 AM Ti-6Al-4V 합금의 마르텐사이트 α' phase에 의하여 SM Ti-6Al-4V 합금에 비하여 더 견고한 TiO_2 피막을 형성하였기 때문으로 판단된다.

Fig. 2는 양극산화 전 시료와 9 V, 45 V, 90 V를 인가하여 양극산화 처리를 한 시료 표면의 거칠기를 측정 한 결과이다. Fig. 2a, b를 통해 SM Ti-6Al-4V 합금과 AM Ti-6Al-4V 합금 두 합금 모두 양극산화 처리 전 가장 표면 조도가 거칠었다. SM Ti-6Al-4V 합금은 양극산화 처리를 하였을 때 인가 전압에 상관없이 표면 조도가 약 0.07 μm 정도로 비슷하게 측정되었다. AM Ti-6Al-4V 합금은 인가 전압이 9 V, 90 V일 때 SM Ti-6Al-4V 합금에 비해 약 0.017 μm 더 거친 표면을 보였다. 인가 전압이 45 V일 때 AM Ti-6Al-4V 합금의 표면 거칠기는 약 0.113 μm 로 모든 시료들 중 가장 거친 표면을 보였다.

3.2 표면관찰 및 분석

Fig. 3는 양극산화 처리 후 실체현미경으로 관찰한 사진이며 Fig. 4는 양극산화 처리 후 표면 반사광 스펙트럼을 측정 한 결과이다. 육안 및 실체현미경으로 관찰 시 SM Ti-6Al-4V 합금과 AM Ti-6Al-4V 합금 두 합금 간 색상의 차이는 크지 않았다. 그러나 실체현미경에서 관찰된 미세한 시료 표면의 색상 변화를 Fig. 4의 반사광 스펙트럼을 통해 더 명확하게 비교 분석할 수 있다. 9 V 전압을 인가할 경우, 육안으로는 SM Ti-6Al-4V 합금이 AM Ti-6Al-4V 합금에 비해 표면 색상이 조금 더 짙은 경향을 보인다. 해당 시료들을 대상으로 반사광 스펙트럼을 분석해보면 가시광선 파장 중 붉은색을 띠는 장파장(620 nm ~ 750 nm) 영역 [12,13]에서 SM Ti-6Al-4V 합금의 반사율이 더 높은 것을 확인할 수 있다. 45 V를 인가한 SM 시료는 9V 시료와 약간의 색상 차이가 있는데(Fig. 3), 반사광 스펙트럼을 비교해보면 반사율 자

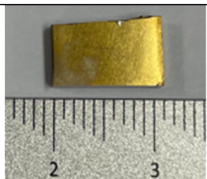
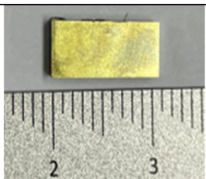
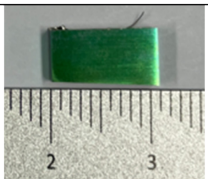
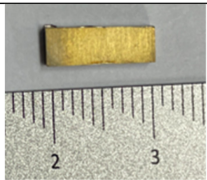
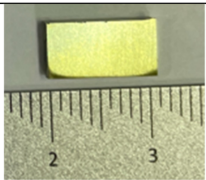
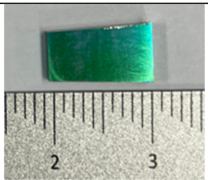
Sample name \ Voltage (V)	9	45	90
SM Ti-6Al-4V			
AM Ti-6Al-4V			

Fig. 3. Color of anodized (a) SM Ti-6Al-4V and (b) AM Ti-6Al-4V

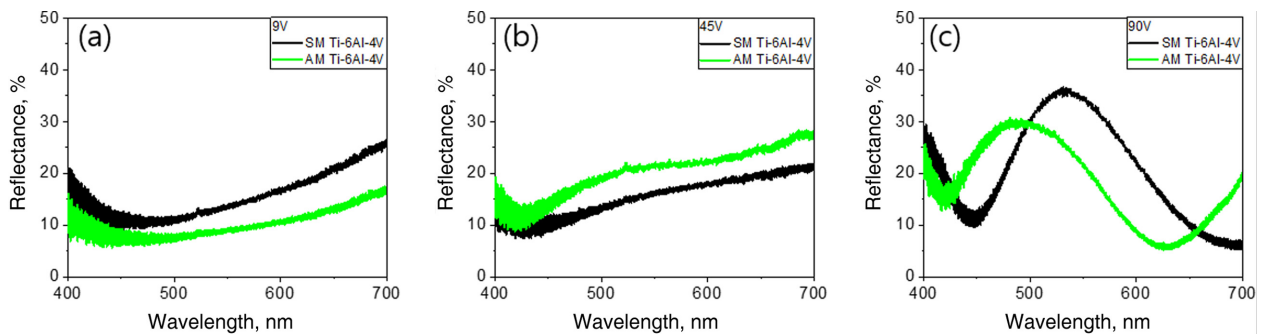


Fig. 4. Reflectance spectra of the Ti-6Al-4V specimens anodized at (a) 9 V, (b) 45 V, and (c) 90 V

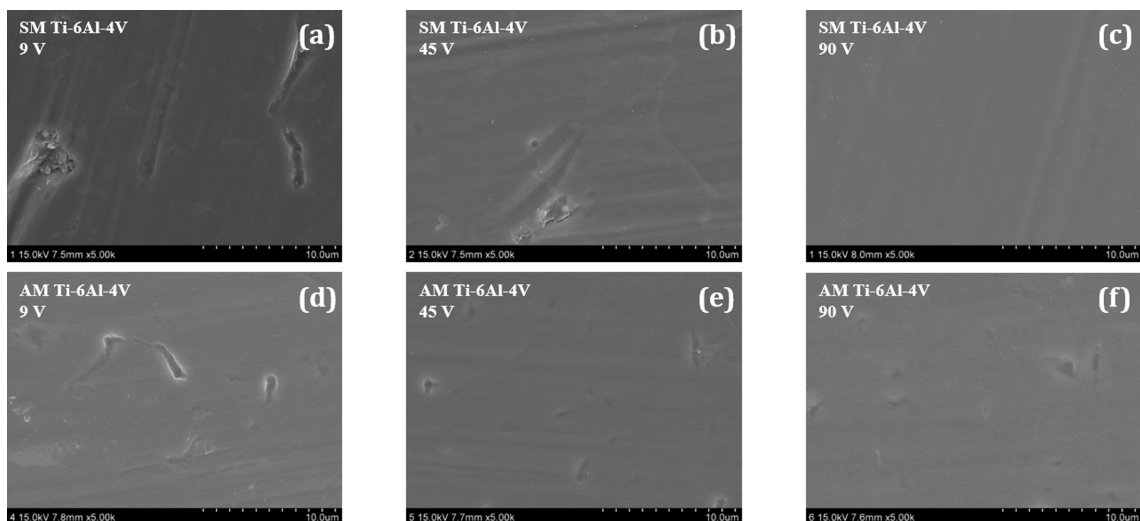


Fig. 5. SEM images of the surface after anodization at 9 V (a, d), 45 V (b, e), 90 V (c, f) for SM Ti-6Al-4V and AM Ti-6Al-4V alloys

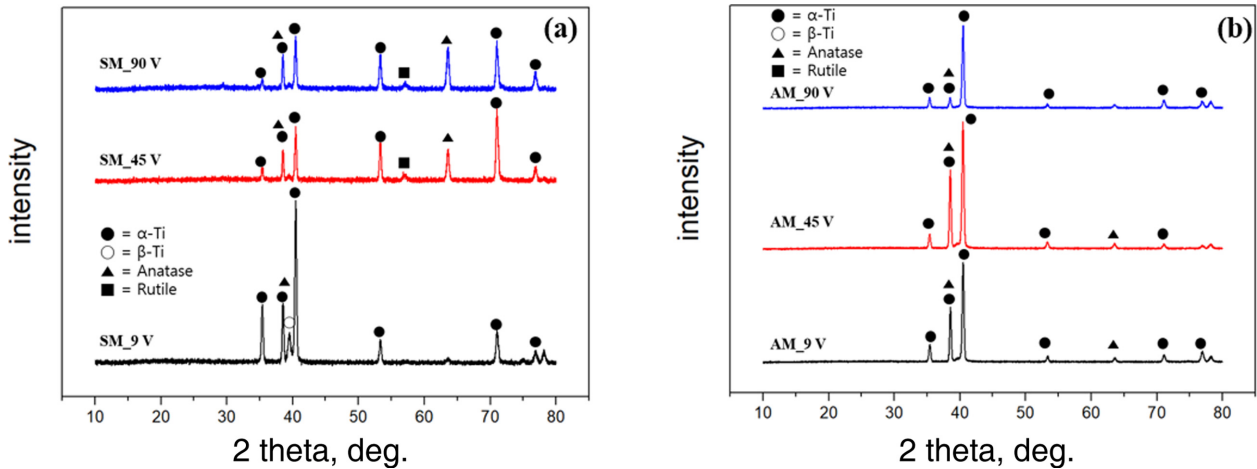


Fig. 6. XRD analysis results of of (a) SM Ti-6Al-4V and (b) AM Ti-6Al-4V

체는 별 차이가 없으나 장파장 영역에서의 반사율이 상대적으로 약간 낮다(Fig. 4). 즉 색상이 약간 푸른 쪽으로 치우치는 것으로 보인다. 45 V 전압을 인가한 AM 시료의 경우, 9 V를 인가한 경우에 비해 500 nm ~ 700 nm 영역에서 전체적으로 반사율이 증가한 것을 확인할 수 있다. 따라서 색의 변화보다는 표면 광택이 더 높아진 것으로 판단된다. 90 V일 때는 9 V, 45 V와 색상 차이가 두드러지는데(Fig. 3), 반사광 스펙트럼의 변동 또한 큰 것을 확인할 수 있다(Fig. 4).

Fig. 5는 주사전자현미경으로 관찰한 양극산화 처리 후 표면 사진이다. 두 합금 모두 모든 인가전압에서 다공성 피막이 관찰되지 않았다. 양극산화 시, 다공성 피막이 형성되기 위해서는 불소이온이 포함된 전해질에서 양극산화 공정이 진행되어야 한다 [9-11,14-16]. 하지만 본 연구에서 사용한 전해질은 불소이온이 포함되어 있지 않아 장벽형 피막이 형성될 수 있었다. 인가 전압이 증가함에 따라 두 합금 모두 피막이 조금 더 균질해지는 경향을 보였다.

3.3 XRD 분석

Fig. 6는 양극산화처리 후 시료의 표면에 대해서 XRD 분석한 결과이다. Fig. 6를 통해 두 합금 모두 모든 인가전압에서 α -Ti가 지배적으로 관찰되었다. Rutile 상은 AM Ti-6Al-4V 합금에서는 모든 인가전압에서 관찰되지 않았으며 SM Ti-6Al-4V를 45 V, 90 V로 양극산화 시 낮은 세기로 검출되었다.

3.4 GDS 분석

Fig. 7는 양극산화처리 후 시료의 표면을 GDS를 통해 깊이별 원소 조성을 분석한 결과이다. 두 시료 모두 GDS 분석 데이터는 비슷한 경향성을 보였다. 9 V로 양

극산화처리를 진행하였을 때는 두 시료의 깊이에 따른 각 원소 검출량의 차이가 크지 않았다. SM Ti-6Al-4V 합금은 45 V로 양극산화처리 하였을 때 0.3 μm 까지, 90 V로 양극산화처리 하였을 때는 0.6 μm 까지 산소가 검출되었다. 또한 인가전압이 동일한 경우, AM Ti-6Al-4V 합금 대비 SM Ti-6Al-4V 합금은 약 0.2 μm 더 깊은 곳까지 산소가 검출되었다. AM Ti-6Al-4V 합금은 인가전압과 관계없이 비슷하게 산소가 약 0.2 μm 까지 검출되었다. 따라서 SM Ti-6Al-4V 합금은 양극산화처리를 진행하는 인가전압이 커질수록 양극산화피막이 두껍게 생성되고 AM Ti-6Al-4V 합금은 인가전압과 관계없이 비슷한 수준의 양극산화피막 두께를 형성하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7를 통해서 표면으로부터 깊이 방향에 따른 다양한 원소들의 함량을 확인할 수 있다. P을 제외한 원소들은 SM Ti-6Al-4V 합금과 AM Ti-6Al-4V 합금 모두 큰 차이 없이 표면에서 농도가 최소이고 금속 기지 방향으로 갈수록 농도가 높아지는 경향성을 공통적으로 보인다. 그러나 P는 표면에서 농도가 높았다가 피막 안쪽에서는 낮은 농도를 보인다. 또한 표면의 P 함량은 SM Ti-6Al-4V 합금보다 AM Ti-6Al-4V 합금이 모든 인가전압에서 더 높다.

3.5 XPS 분석

Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11는 양극산화 처리 후 시료의 표면을 XPS 분석한 결과이다. 각 시료의 표면에 대해서 XPS O 1s 스펙트럼을 분석한 결과(Fig. 8), TiO_2 , Al_2O_3 , VOPO_4 의 피크가 관찰되었다. 이 중 AM Ti-6Al-4V 합금의 TiO_2 피크는 SM Ti-6Al-4V 합금보다 더 강하게 관찰되는 경향을 보였다. Gai [17], Vasquez [18]의 연구에 따르면 AM Ti-6Al-4V 합금은 SM Ti-6Al-4V 합금에 비해 미세조직의 결함이 많고 전기화학적 반응

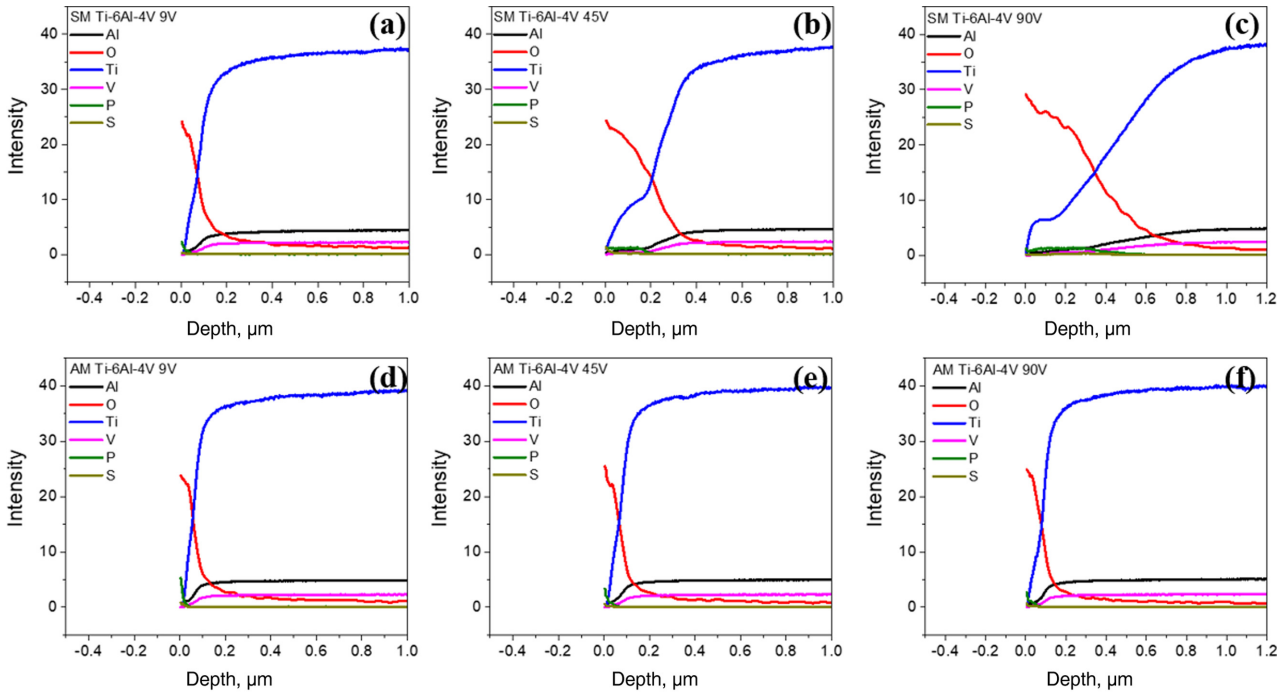


Fig. 7. GDS depth profiles of Al, O, Ti, V, P, and S elements for (a-c) SM Ti-6Al-4V and (d-f) AM Ti-6Al-4V alloys treated at 9 V, 45 V, 90 V

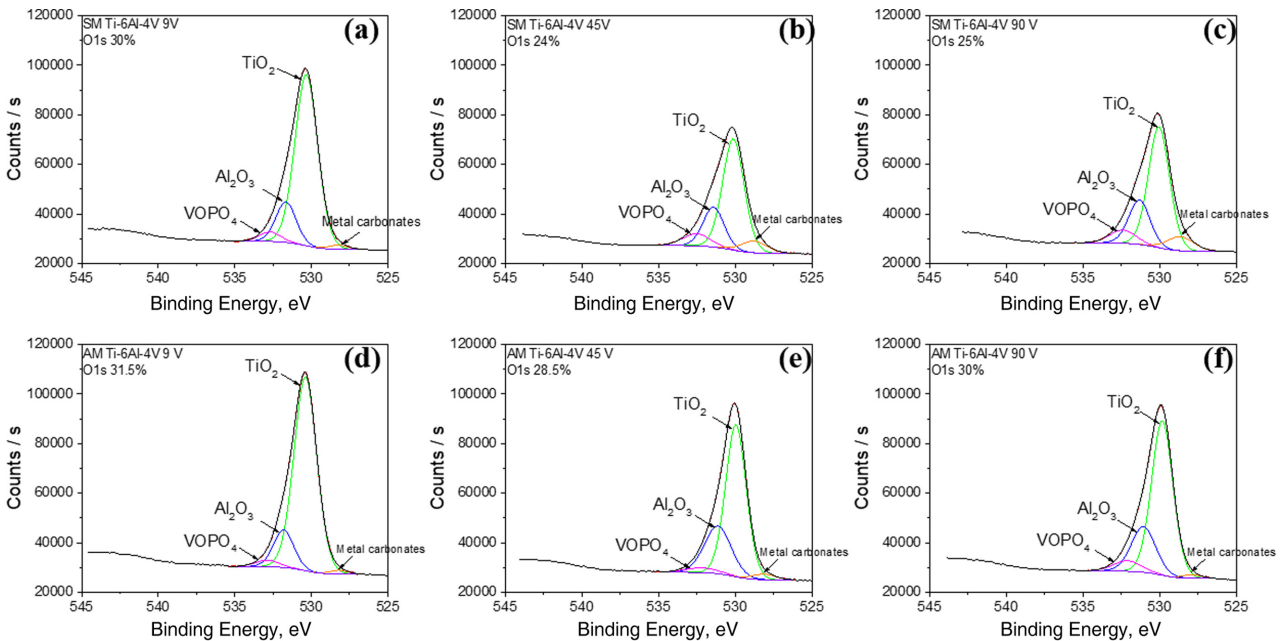


Fig. 8. O 1s spectra measured by XPS for (a-c) SM Ti-6Al-4V and (d-f) AM Ti-6Al-4V alloys treated at 9 V, 45 V, 90 V

성이 더 커서 TiO_2 가 더 잘 형성될 수 있다고 하였다.

XPS Ti 2p (Fig. 9) 및 Al 2p (Fig. 10) 스펙트럼 분석결과, Ti는 대부분 TiO_2 의 형태로 존재하는 것으로 확인되며 그 이외에 낮은 농도로 TiOS, Ti_2O_3 도 검출되었다. Al은 모두 Al_2O_3 의 형태로 관찰되었다. Ti와 Al에

대하여, SM Ti-6Al-4V 합금과 AM Ti-6Al-4V 합금 모두 인가전압에 따른 피크 변화는 크게 관찰되지 않았다. 다만 AM Ti-6Al-4V 합금을 90 V로 양극산화 시, 다른 시료와 달리 73 eV 근방에서 또다른 Al_2O_3 피크가 관찰되기도 하였다.

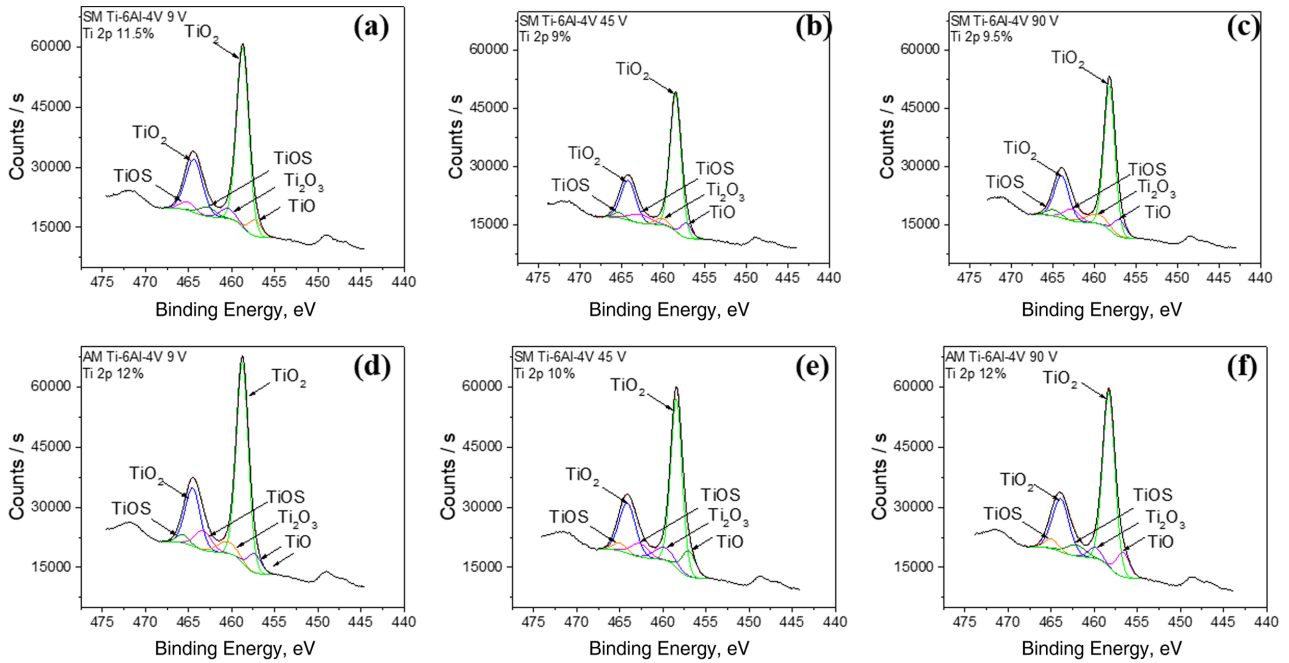


Fig. 9. Ti2p spectra measured by XPS for (a-c) SM Ti-6Al-4V and (d-f) AM Ti-6Al-4V alloys treated at 9 V, 45 V, 90 V

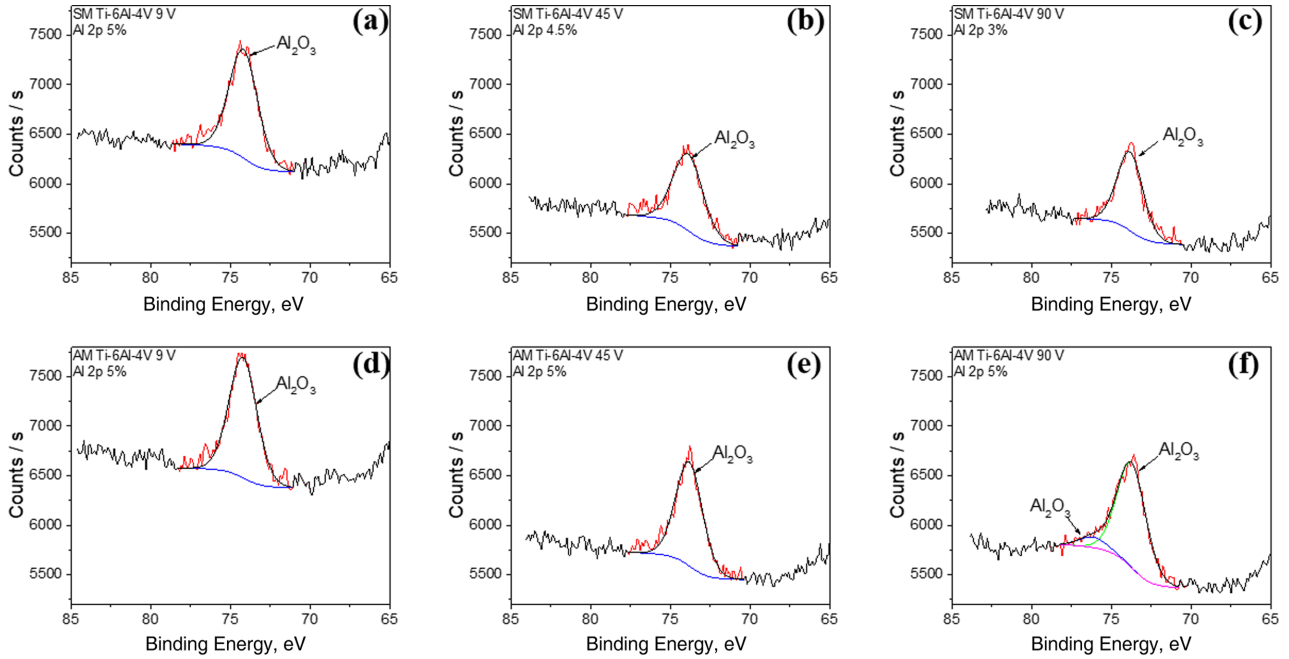


Fig. 10. Al2p spectra measured by XPS for (a-c) SM Ti-6Al-4V and (d-f) AM Ti-6Al-4V alloys treated at 9 V, 45 V, 90 V

XPS V 2p 스펙트럼 분석 결과(Fig. 11), SM 및 AM Ti-6Al-4V 합금에서는 인가전압 관계없이 V oxides, VOPO₄, VO₂의 스펙트럼이 관찰되었다. SM 합금에서는 인가전압이 증가할수록 VO₂의 비율이 작아지는 반면, AM Ti-6Al-4V 합금에서는 인가전압이 증가할수록 VOPO₄의 비율이 감소하는 경향을 보였다.

즉, 인가전압이 높을수록 O 1s 스펙트럼에서는 TiO₂의 비율이 감소하며 V 2p 스펙트럼에서는 SM 합금에서는 VO₂, AM 합금에서는 VOPO₄의 비율이 감소하는 경향성을 볼 수 있다. TiO₂는 흰색, VO₂는 짙은 파란색, VOPO₄는 노란색을 띠는 것으로 알려져 있다. 인가전압에 따른 색상 차이를 가져오는 것은 주로는 TiO₂ 산화

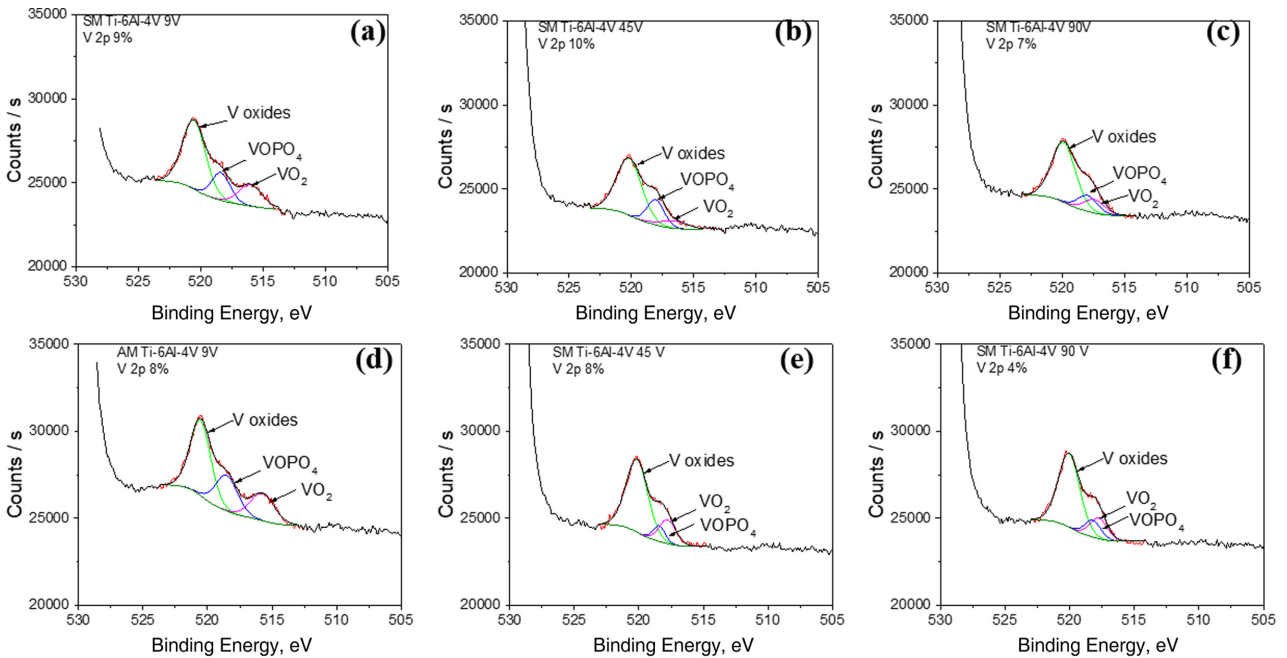


Fig. 11. V2p spectra measured by XPS for (a-c) SM Ti-6Al-4V and (d-f) AM Ti-6Al-4V alloys treated at 9 V, 45 V, 90 V

막의 두께 [3]이나, SM과 AM의 미묘한 색상 차이는 VO₂와 VOPO₄의 비율이 서로 다르기 때문으로 생각된다. Fig. 11의 스펙트럼을 자세히 들여다보면, 45 V에서 산화된 SM에서는 VOPO₄가 VO₂보다 높은 비율을 차지하나 AM에서는 그 반대의 경향을 갖는다. 이것은 Fig. 4b의 반사광 스펙트럼에서 노란색의 대표 파장인 570 nm 대비 파란색의 대표 파장인 480 nm의 반사율 비는 SM 합금에서 1.33, AM 합금에서 1.29로 SM이 약간 더 노란 색을 띠는 것과 일치한다.

3.6 동전위 분극 시험

Fig. 12는 양극산화 처리 후 시료의 내식성을 분석하

기 위해 3.5 wt. % NaCl 수용액에서 동전위 분극 시험을 진행한 결과이다. Fig. 13는 동전위 분극 시험의 부식 전위, 부식 속도를 나타낸 것이다. Fig. 13a, c를 통해 SM Ti-6Al-4V 합금의 부식 전위는 인가전압이 증가함에 따라 부식전위가 상승하는 것을 확인할 수 있다. AM Ti-6Al-4V 합금의 부식전위는 평균 -0.38 ~ -0.14 V_{SCE} 정도이며 인가전압에 따라 특별한 경향성을 보이지 않는 것을 확인할 수 있다. Fig. 13b, d를 통해 부식 속도는 두 합금 모두 인가 전압이 증가함에 따라 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이 때, SM Ti-6Al-4V 합금의 양극산화 후 부식 속도 평균은 약 4.10×10^{-7} A/cm²에서 약 7.59×10^{-9} A/cm²까지 약 54배 느려진다. AM Ti-

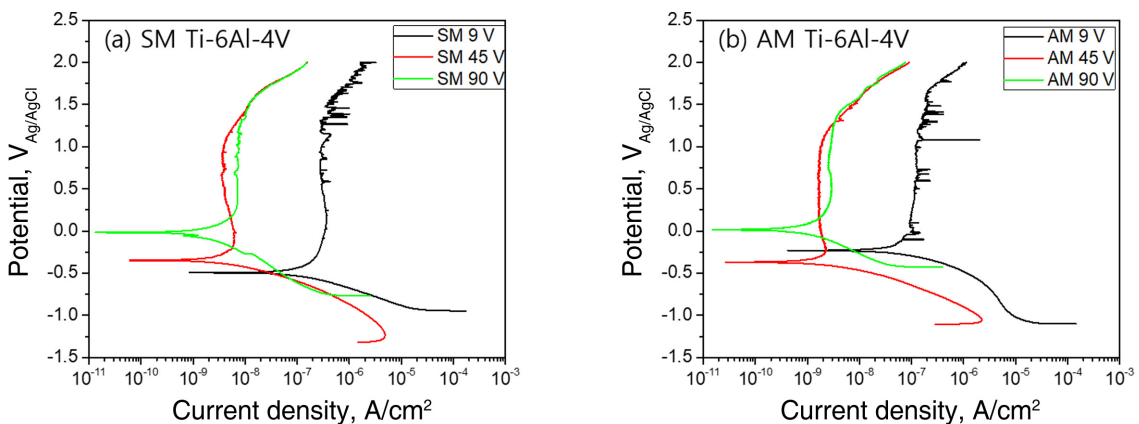


Fig. 12. Potentiodynamic polarization curves of (a) SM Ti-6Al-4V and (b) AM Ti-6Al-4V in 3.5 wt% NaCl solution

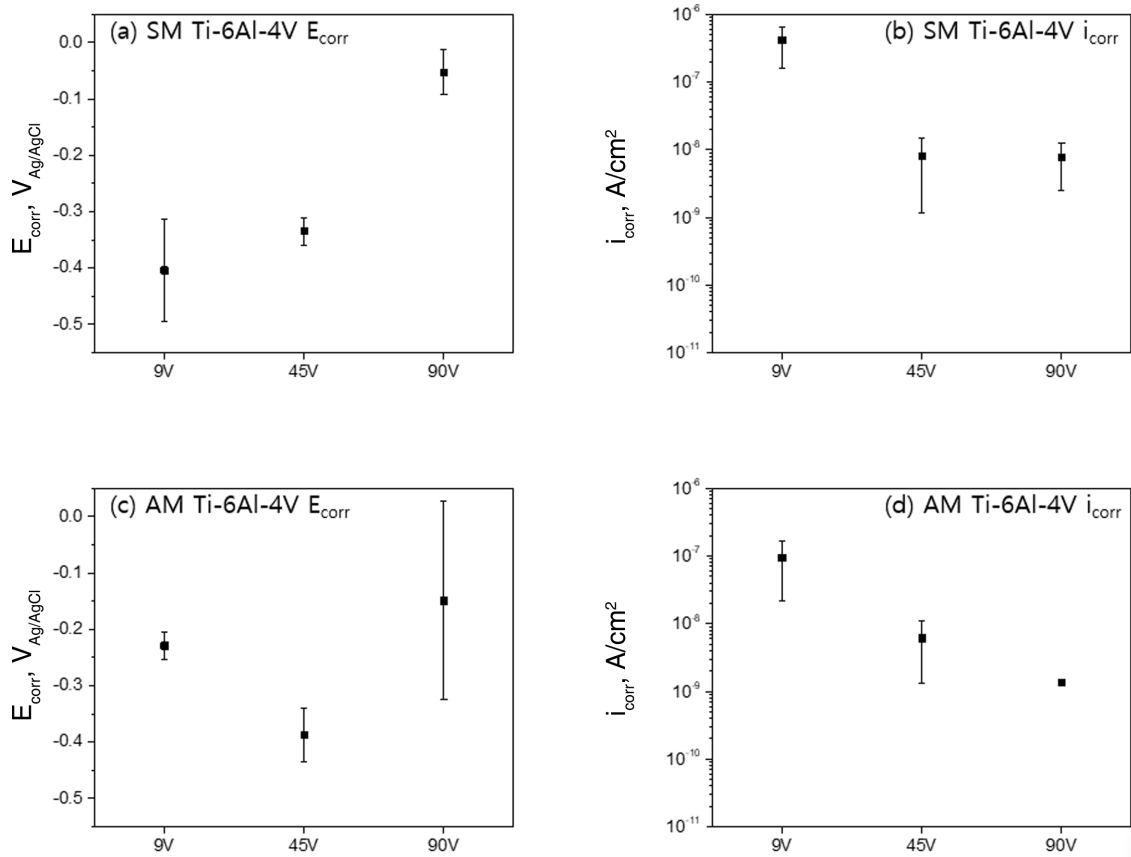


Fig. 13. (a), (c) E_{corr} , (b), (d) i_{corr} of SM Ti-6Al-4V and AM Ti-6Al-4V alloy according to the applied voltage

6Al-4V 합금의 부식속도 평균은 약 9.34×10^{-8} A/cm²에서 1.33×10^{-9} A/cm²까지 약 33배 느려진다.

Fig. 7를 통해 모든 인가전압에서 SM Ti-6Al-4V 합금에 비해 AM Ti-6Al-4V 합금의 표면에서 검출되는 P의 함량이 더 높은 것을 알 수 있다. 표면의 P 원소는 anatase TiO₂에서 rutile TiO₂로의 상전이를 지연시키는데 영향이 있다고 알려져 있다 [19]. rutile 상이 anatase 상 보다 내식성이 뛰어나다고 알려져 있는데 [7,8,20,21] AM Ti-6Al-4V 합금의 경우, SM Ti-6Al-4V 합금에 비해 표면에서 검출되는 P의 함량이 더 높아 rutile 상이 형성될 가능성이 낮으며, 이것은 Fig. 6을 통해서도 확인된다. 양극산화 처리를 진행한 AM Ti-6Al-4V 합금의 부식 속도 변화가 SM Ti-6Al-4V 합금보다 더 적은 것은 P 함량과 관련이 있을 것으로 생각된다. 또한 AM Ti-6Al-4V 합금은 SM Ti-6Al-4V 합금 대비 부식 속도가 느린 것을 알 수 있는데 비교적 높은 표면 P 함량으로 인해 rutile 상변화가 억제되고 산화피막의 안정성이 유지되어 부식 속도가 SM Ti-6Al-4V 합금 보다 느린 것으로 판단된다. SM Ti-6Al-4V 합금은 인가전압이 증가함에 따라 부식전위가 상승하는 것을 확인할 수 있는데 Fig.

7에서 인가전압이 증가함에 따라 O 검출량 깊이가 깊어지는 것을 통해 양극산화피막 두께가 증가한 것이 내식성 향상에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

4. 결론

1. SM Ti-6Al-4V 합금과 AM Ti-6Al-4V 합금 모두 인가 전압에 따른 거칠기는 큰 차이는 없었다.
2. 양극산화 시 경도가 SM Ti-6Al-4V 합금은 330 HV에서 335 ~ 350 HV로, AM은 330 HV에서 350 ~ 380 HV로 향상되었다. SM Ti-6Al-4V 합금 대비 AM Ti-6Al-4V 합금의 경도 향상률이 약 5 ~ 10% 더 높았다.
3. 양극산화 후 SM Ti-6Al-4V 합금과 AM Ti-6Al-4V 합금의 색상은 육안으로는 인가전압이 9 V일 때는 진한 황색, 45 V일 때는 밝은 황색, 90 V일 때는 청녹색으로 관찰되었다. SM과 AM 간의 차이는 육안으로는 구분하기는 어려웠으나, 반사광 스펙트럼을 활용해서 분석한 결과, 상대적으로 SM은 노란색, AM은 파란색 쪽으로 미세하게 치우치는 경향이 관찰되었다.
4. GDS 분석결과, 표면에서 깊이 방향으로 다양한 원

소들의 검출 경향성은 두 합금이 비슷한 경향성을 보였다. 하지만 SM Ti-6Al-4V 합금보다 AM Ti-6Al-4V 합금에서는 표면에서 P 원소 함량이 더 높게 검출되었다.

5. XPS 및 XRD 분석 결과, 산화 피막의 주성분은 anatase TiO₂이며 SM 합금에 45 V 이상을 인가한 경우에는 일부 rutile TiO₂가 관찰되었다. Al은 Al₂O₃로서 존재하며, V은 VOPO₄, VO₂의 형태로 함유되어 있다. VOPO₄와 VO₂의 비율이 SM과 AM 합금에서 약간의 차이가 있으며, 이것이 산화피막의 미세한 색상 차이를 가져온다고 볼 수 있다.

6. SM Ti-6Al-4V 합금과 AM Ti-6Al-4V 합금 모두 인가전압이 증가함에 따라 부식속도는 느려지는 경향을 보였다. SM Ti-6Al-4V 합금은 인가전압 증가에 따른 산화피막 두께 증가로 부식전위가 높아지는 경향을 보였고 AM Ti-6Al-4V 합금은 SM Ti-6Al-4V 합금보다 높은 P 원소 함량으로 모든 인가전압에서 SM Ti-6Al-4V 합금보다 느린 부식 속도를 보였다.

Acknowledgments

이 논문은 2020년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

References

1. A. C. W. Ting, S. W. K. Cheng, L. L. H. Wu, and G. Cheung, Changes in Venous Hemodynamics after Superficial Vein Surgery for Mixed Superficial and Deep Venous Insufficiency, *Journal of Materials Research*, **16**, 1712 (2001). Doi: <https://doi.org/10.1007/s002680020051>
2. C. Palanisamy, R. Raghu, and B. Ravisankar, Anodizing and Its Effects on Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Laser Additive Manufactured Ti-6Al-4V Alloy, *International Journal of Materials Research*, **111**, 654 (2020). Doi: <https://doi.org/10.3139/146.111931>
3. A. Karambakhsh, A. Afshar, S. Ghahramani, and P. Malekinejad, Pure Commercial Titanium Color Anodizing and Corrosion Resistance, *Journal of Materials Engineering and Performance*, **20**, 1690 (2011). Doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-011-9860-0>
4. W. C. Saraswati, A. Anawati, I. N. Jujur, and M. D. Gumelar, Effect of Coloring by Anodizing on the Corrosion Behavior of Ti-6Al-4V Alloy, *AIP Conference Proceedings*, **2232**, 020012 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1063/5.0001483>
5. E. Krasicka-Cydzik, A. Kierzkowska, and I. Glazowska, Behavior of Anodic Layer in Ringer's Solution on Ti-6Al-4V ELI Alloy after Bending, *Archives of Materials Science and Engineering*, **28**, 231 (2007). Doi: <http://www.amse.acmsse.h2.pl/index.php?id=87>
6. A. K. Sharma, Anodizing Titanium for Space Applications, *Thin Solid Films*, **208**, 48 (1992). Doi: [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(92\)90946-9](https://doi.org/10.1016/0040-6090(92)90946-9)
7. M. Molaei, A. Fattah-alhosseini, M. Nouri, P. Mahmoodi, and A. Nourian, Incorporating TiO₂ Nanoparticles to Enhance Corrosion Resistance, Cytocompatibility, and Antibacterial Properties of PEO Ceramic Coatings on Titanium, *Ceramics International*, **48**, 21005 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.04.096>
8. A. Cely-González, Y. Pineda, and O. Gómez-Puentes, Anodization of Ti-6Al-4V Alloy Manufactured by 3D Printing and Evaluation of Corrosion and Wear Properties, *Dyna*, **89**, 76 (2022). Doi: <https://doi.org/10.15446/dyna.v89n224.101720>
9. S.-Y. Yoo and H. G. Park, Effect of Anodic Oxidation Process Parameters on TiO₂ Nanotube Formation in Ti-6Al-4V Alloys, *Corrosion Science and Technology*, **57**, 521 (2019). Doi: <https://doi.org/10.3365/KJMM.2019.57.8.521>
10. G. D. Gim, S. S. Jang, and H. S. Kim, Effects of NH₄F and H₂O on the Geometry of TiO₂ Nanotubes, *Corrosion Science and Technology*, **17**, 138 (2018). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2018.17.3.138>
11. Y. J. Choi and C. Y. Jeong, Influence of Electrolyte on the Shape and Characteristics of TiO₂ during Anodic Oxidation of Titanium, *Corrosion Science and Technology*, **22**, 193 (2023). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2023.22.3.193>
12. Q. Cridling, R. Charriere, D. Jamon, M. Lenci, M. Pedferri, and D. Delafosse, Anodized Titanium Oxide Thickness Estimation with Ellipsometry, Reflectance Spectra Extrema Positions and Electronic Imaging: Importance of the Interfaces Electromagnetic Phase-Shift, *Thin Solid Films*, **709**, 138181 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2020.138181>
13. S. A. Robila, Band Reduction for Hyperspectral Imagery Processing, *Computational Imaging VIII*, **7533**, 75330G (2010). Doi: <https://doi.org/10.1117/12.837953>
14. Y. Xue, Y. Sun, G. Wang, K. Yan, and J. Zhao, Effect of NH₄F Concentration and Controlled-Charge Consumption on the Photocatalytic Hydrogen Generation of TiO₂ Nanotube Arrays, *Electrochimica Acta*, **155**, 312 (2015). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.12.134>
15. Y. Q. Liang, Z. D. Cui, S. L. Zhu, and X. J. Yang, Study on the Formation Micromechanism of TiO₂ Nanotubes on Pure Titanium and the Role of Fluoride Ions in Electrolyte Solutions, *Thin Solid Films*, **519**, 5150 (2011).

- Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.01.075>
16. J. M. Macak, H. Hildebrand, U. Marten-Jahns, and P. Schmuki, Mechanistic Aspects and Growth of Large Diameter Self-Organized TiO₂ Nanotubes, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **621**, 254 (2008). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2008.01.005>
 17. X. Gai, Y. Bai, J. Li, S. Li, W. Hou, Y. Hao, X. Zhang, R. Yang, and R. D. K. Misra, Electrochemical Behaviour of Passive Film Formed on the Surface of Ti-6Al-4V Alloys Fabricated by Electron Beam Melting, *Corrosion Science*, **145**, 80 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.09.010>
 18. F. A. Vásquez, R. A. Ocampo, N. Bedoya, A. A. Z. Gil, C. Botero, M. Gómez, J. G. Castaño, and J. A. Tamayo, Electrochemical Characterization of TiO₂ Nanotubes Formed on Ti-6Al-4V Manufactured by PBF-EB or Forging, *Progress in Additive Manufacturing*, **10**, 3629 (2025). Doi: <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00806-7>
 19. R. Zheng, L. Lin, J. Xie, Y. Zhu, and Y. Xie, State of Doped Phosphorus and Its Influence on the Physicochemical and Photocatalytic Properties of P-Doped Titania, *The Journal of Physical Chemistry C*, **112**, 15502 (2008). Doi: <https://doi.org/10.1021/jp806121m>
 20. N. F. Dummer, J. K. Bartley, and G. J. Hutchings, Vanadium Phosphate Materials as Selective Oxidation Catalysts, *Advances in Catalysis*, **54**, 189 (2011). Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387772-7.00004-6>
 21. M. Faizan, R. Zhang, and R. Liu, Vanadium Phosphorus Oxide Catalyst: Progress, Development and Applications, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **110**, 27 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.02.049>